Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 15, No. 2, 2025, p. 193-209

Design, Construction, and Evaluation of a Spatial Depth Measurement System for Subsoiler in Sugarcane Fields

N. Loveimi[1*], A. Azizi[1], A. Kaab[2], A. Neisi[3]

1- Agricultural Engineering Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ahvaz, Iran
2- Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran and Mechanization and remote sensing expert of Imam Khomeini Sugarcane Agro-Industrial Company, Ahvaz, Iran
3- Department of Soil Science, Shahid Chamran University of Ahvaz and Head of Water, Soil and Meteorology Department of Imam Khomeini Sugarcane Agro-Industrial Company, Ahvaz, Iran
(*- Corresponding Author Email: n1584m@yahoo.com)

Received: 28 April 2024 Revised: 12 June 2024 Accepted: 19 June 2024 Available Online: 23 February 2025	**How to cite this article:** Loveimi, N., Azizi, A., Kaab, A., & Neisi, A. (2025). Design, Construction, and Evaluation of a Spatial Depth Measurement System for Subsoiler in Sugarcane Fields. *Journal of Agricultural Machinery, 15*(2), 193-209. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2024.87809.1242

Introduction

Subsoiling is a critical tillage operation for many crops, particularly sugarcane, due to the impact of agricultural machinery traffic and its significance in managing heavy-textured and compacted soils. Given the extensive size of sugarcane fields and the time-intensive nature of subsoiling operations, the application of intelligent control techniques for monitoring and managing these processes is of considerable importance. Currently, subsoiling operations are monitored using manual gauges. This approach involves collecting a limited number of samples per hectare, typically after the operation is completed, which makes it nearly impossible to implement real-time corrections. To address this limitation, the development and implementation of a depth measurement system offer a promising solution. Such a system enables real-time observation of working depth by both the operator, via an on-screen display, and by a remote observer through an online platform. This capability allows for immediate adjustments during the operation, ensuring greater precision and efficiency. Furthermore, by integrating recorded depth data with geospatial information, it becomes possible to generate detailed maps illustrating depth variations across the field. These maps can serve as valuable tools for further evaluations, such as performance monitoring in areas where subsoiling depth deviates from the desired range, either being too shallow or excessively deep. This technological advancement has the potential to significantly enhance the accuracy and effectiveness of subsoiling operations in modern agricultural practices.

Materials and Methods

This study focused on the design, development, and evaluation of a depth measurement system for a subsoiler attached to a track-type tractor, specifically tailored for sugarcane fields. The system not only provided real-time depth display but also recorded the location and transmitted it online. The research employed three distinct depth measurement techniques and was conducted using a randomized complete block design with split plots. The main plots are the three depth measurement techniques: based on the angles of the driving profiles of the subsoiler shanks (T_1), the laser distance measurement method (T_2), and the ultrasonic distance measurement



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

https://doi.org/10.22067/jam.2024.87809.1242

method (T_3), and sub-plots are depth ranges at three levels: 0-30 cm (R_1: surface range), 30-60 cm (R_2: mid-range), and 60-90 cm (R_3: deep range). Initially, we calculated the absolute difference between the depths recorded by the system and those measured manually with a rod at each location. Following this, we analyzed key statistical indicators, including the average, standard deviation, and the minimum and maximum of errors, for comparison.

Results and Discussion

The results showed that the depth measurement error was significantly influenced by the technique employed. The angle technique yielded the lowest average error of 1.91 cm, while the ultrasonic technique resulted in the highest average error of 3.83 cm. Across all depth ranges, statistical indicators for depth error were significant. Specifically, within these ranges, the deep range exhibited an average depth error of 2.33 cm, and the surface range had an average error of 3.65 cm. Statistical analysis revealed that only indices related to minimum and maximum errors for interactions between factors were significant. The lowest minimum error value (0.05 cm) was observed with the angle technique at deeper depths, whereas the highest minimum error (0.34 cm) occurred with ultrasonic measurements at shallower depths on surfaces. Similarly, maximum errors followed this trend: The lowest maximum error (3.21 cm) was associated with angle measurements at deeper depths, while ultrasonic measurements on surfaces yielded a higher maximum error (8.63 cm). Both laser and ultrasonic techniques consistently demonstrated greater errors across all three depth ranges compared to angle-based methods. This discrepancy may be attributed to inaccuracies inherent in rangefinders when their beams encounter obstacles like clods or pits during field operations. Notably, as working depths increased across all measurement techniques, errors in depth measurement decreased significantly due to reduced vibrations from subsoiler devices at greater depths, thereby minimizing vibration-related inaccuracies.

Conclusion

The results indicate that the depth measurement technique based on the angles of the driving profiles of subsoiler shanks exhibits superior accuracy in determining the working depth of subsoilers mounted on tractors, particularly during sugarcane field operations. The laser distance meter technique ranked second in terms of accuracy, while the ultrasonic distance meter method demonstrated the least precision. Notably, as working depths increased, reduced vibrations during operation were observed, leading to enhanced accuracy in depth calculations across all techniques. This improvement is attributed to decreased mechanical disturbances at greater depths. Overall, measurements within deeper ranges achieved higher levels of accuracy compared to those at shallower surface ranges. This trend suggests that operational conditions and device stability play significant roles in optimizing measurement accuracy.

Keywords: Angle sensor, Depth monitoring, Laser distance meter, Precision farming, Ultrasonic distance meter

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۵، شماره ۲، تابستان ۱٤٠٤، ص ۲۰۹-۱۹۳

طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه سنجش مکانی عمق زیرشکن در مزارع نیشکر

نعیم لویمی [1*]، آذرخش عزیزی [1]، علی کعب [2]، عادل نیسی [3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰

چکیده

زیرشکنی لایه زیرین خاک با توجه به رفت و آمد ماشین‌های کشاورزی و خصوصاً در شرایط بافت سنگین و فشردگی زیاد خاک، برای بسیاری محصولات خصوصاً نیشکر بسیار حیاتی است. در این تحقیق اقدام به طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه سنجش عمق بر روی زیرشکن متصل به بولدوزر در مزارع نیشکر گردید. برای ارزیابی عمق سامانه از قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی به روش کرت‌های یک بار خردشده استفاده گردید. کرت‌های اصلی در سه سطح روش‌های عمق‌سنجی بر مبنای زوایای شاسی‌های محرک شاخه‌های زیرشکن، فاصله‌سنج لیزری و فاصله‌سنج فراصوتی و کرت‌های فرعی در سه سطح عمق ۳۰-۰ (سطحی)، ۶۰-۳۰ (میانی) و ۹۰-۶۰ (عمیق) سانتی‌متری بودند. نتایج نشان داد که تمام شاخص‌های آماری خطای عمق در اثر نوع روش عمق‌سنجی معنی‌دار بود و کمترین و بیشترین میانگین خطای عمق به‌ترتیب با ۱/۹۱ سانتی‌متر در روش زوایا و ۳/۸۳ سانتی‌متر در روش فراصوتی به‌دست آمد. همچنین تمام شاخص‌های آماری خطای عمق در اثر دامنه‌های عمق معنی‌دار بود و کمترین و بیشترین میانگین خطای عمق به‌ترتیب با ۲/۳۳ سانتی‌متر در دامنه عمیق و ۳/۶۵ سانتی‌متر در دامنه سطحی به‌دست آمد. همچنین فقط شاخص‌های آماری حداقل و حداکثر خطا در اثر متقابل دو عامل معنی‌دار بودند و کمترین و بیشترین مقادیر حداقل خطا به‌ترتیب به روش زوایا و دامنه عمیق با ۰/۰۵ و روش فراصوتی و دامنه سطحی با ۰/۳۴ سانتی‌متر تعلق داشت در حالی‌که کمترین و بیشترین مقادیر حداکثر خطا به‌ترتیب به روش زوایا و دامنه عمیق با ۳/۲۱ و روش فراصوتی و دامنه سطحی با ۸/۶۳ سانتی‌متر تعلق داشت.

واژه‌های کلیدی: پایش عمق، حسگر زاویه، فاصله‌سنج لیزری، فاصله‌سنج فراصوتی، کشاورزی دقیق

مقدمه

نیشکر مهم‌ترین محصولی است که برای تولید شکر کشت می‌شود. حدود ۶۰ درصد شکر جهان از نیشکر و حدود ۴۰ درصد آن از چغندرقند تولید می‌شود. علاوه بر تولید شکر، مواد دیگری نیز مانند علوفه، فیبر، خوراک دام، ملاس از نیشکر تولید می‌شود (TaheriGaravand, Asakereh, & Haghani, 2010).

استان خوزستان تنها استانی در کشور است که در آن محصول نیشکر کشت می‌شود. در سند الگوی کشت، نیشکر جزو کشت‌های مصوب استان خوزستان در نظر گرفته شده و سطح زیر کشت آن ۸۹ هزار هکتار پیشنهاد شده است (Anonymous, 2021). دوره تناوب محصول نیشکر دو تا پنج سال طول می‌کشد و در بعضی موارد با توجه به شرایط مساعد خاک و مزرعه تا هفت سال هم مزرعه می‌تواند عملکرد قابل‌قبول در هر سال داشته باشد. به مزارع نیشکری که سال اول کشت شده، پلنت و به مزارع سال‌های بعد، راتون می‌گویند (Kaab, Sharifi, & Mobli, 2019). عملیات تهیه زمین برای کشت نیشکر به‌دلیل تناوب بلندمدت بسیار مهم و در عمق‌های زیاد انجام می‌شود. دیسک اولیه جهت خراب کردن جویچه‌های[4] محصول قبل، دو بار زیرشکنی، گاوآهن‌برگردان‌دار، چندین بار دیسک، و ایجاد جویچه‌ها، مجموعه عملیات تهیه زمین نیشکر است (Anonymous, 2023).

۱- بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران
۲- گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران و کارشناس مکانیزاسیون و سنجش از دور، کشت و صنعت امام خمینی (ره)، اهواز، ایران
۳- گروه خاکشناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز و رئیس اداره آب و خاک و هواشناسی، کشت و صنعت امام خمینی (ره)، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: n1584m@yahoo.com)
https://doi.org/10.22067/jam.2024.87809.1242

4- Furrows

به دلیل بافت سنگین خاک در استان خوزستان، دوره تناوب چندساله نیشکر، تردد سالیانه بسیاری از ماشین‌های کشاورزی از جمله ماشین سنگین برداشت نیشکر[1]، در طی این دوره، و فشردگی زیاد خاک بعد از اتمام این دوره، دو بار زیرشکنی، زیرشکنی دوم به‌صورت مورب نسبت به جهت زیرشکنی اول، به‌عنوان اولین عملیات اصلی تهیه زمین برای نیشکر صورت می‌گیرد (Naseri, Gholamiparshekuhi, Ranjbar, & Mohammad Zamani, 2022). زیرشکنی، عمیق‌ترین عملیات کشاورزی در خاک محسوب می‌شود. عمق زیرشکنی در زمان انجام عملیات تهیه زمین نیشکر ۸۰ تا ۹۰ سانتی‌متر توصیه شده است. زیرشکن همچنین در عملیات داشت به‌صورت سالیانه زمانی‌که ارتفاع نیشکر حدود ۵۰ سانتی‌متر است بین خطوط سبز، جهت هوادهی و مبارزه مکانیکی با علف‌های هرز به‌کار می‌رود و عمق آن در این مرحله در حدود ۴۵ تا ۵۰ سانتی‌متر انجام می‌شود (Mahohi & Khatinzadeh, 2021).

خاک‌ورزی شدید، استفاده از ماشین‌های سنگین برداشت و تردد کامیون‌های حمل و نقل نی در مزرعه که اغلب در شرایط رطوبتی نامناسب انجام می‌شود، از جمله عوامل مؤثر بر فشردگی لایه زیرین و تخریب ساختمان خاک در لایه بالایی می‌باشد (Pankhurst *et al.*, 2003; Cheong, Kwong, & Preez, 2009; Torres, Pereira, Cunha, Martins, & Vieira, 2013). در اثر عبور چرخ‌های تراکتور هنگام اجرای عملیات زراعی، جرم مخصوص ظاهری و مقاومت خاک افزایش می‌یابد و درنتیجه حرکت آب و هوا در اطراف ریشه کاهش یافته و عملکرد محصول نیز کم می‌شود (Cassel & Edwards, 1985; Mckyes, Nego, Douglas, Taylor, & Raghavan, 1979). تحقیقات نشان داده است که عملیات خاک‌ورزی، در ابتدا جرم مخصوص ظاهری را به مقدار زیادی کم می‌کند اما با گذشت زمان و به علت ساختمان تode‌ای در خاک و شسته شدن ذرات از افق‌های فوقانی و همچنین تردد بعدی ادوات و ماشین‌های کشاورزی، جرم مخصوص ظاهری را افزایش می‌دهد (Slowinska - Jurkiewicz, 1994). بررسی‌ها نشان داد که تولید محصول ذرت در اثر تراکم خاک حاصل از عبور یک بار محوری ۹ مگاگرم در حدود ۱۸-۵ درصد و در اثر بار محوری ۱۸ مگاگرم حدود ۱۳-۳۹ درصد کاهش می‌یابد (Al-Adawi & Reeder, 1996).

توسعه مکانیزاسیون کشاورزی با افزایش تردد و وزن ماشین‌های کشاورزی در مزارع همراه بود که این امر احتمالاً منجر به متراکم شدن خاک می‌شود. یکی از روش‌های مکانیکی برای حل مسأله فشردگی خاک، استفاده از خاک‌ورزی عمیق مانند نیمه‌زیرشکنی، زیرشکنی و گاوآهن قلمی است (Sharif-Nasab, Heydari, Mehdi-Niya, Sadegh Nejad, & Shahrbanunjad, 2014). میزان تاثیر زیرشکنی در افزایش عملکرد با توجه به بافت خاک، میزان تردد ادوات کشاورزی، و مهم‌تر از همه وجود لایه سخت در خاک تعریف شده است (Mansourirad, 1993). نتایج تحقیقات در مورد تأثیر عملیات زیرشکن بر عملکرد چغندرقند در استان فارس نشان داد که زیرشکنی خاک باعث کاهش مقاومت به نفوذ خاک، جرم مخصوص ظاهری خاک، کاهش درصد چند ریشه‌ای شدن، افزایش نفوذ ریشه، قطر ریشه، و عملکرد می‌شود (Solhjo, Dehghanian, Sepaskhah, & Niromand Jahormi, 2006).

لذا با توجه به اهمیت عملیات زیرشکنی و نقش آن در افزایش عملکرد، رصد عمق کار این عملیات مساله اساسی می‌باشد. در حال حاضر نظارت بر کار عمق زیرشکنی به‌صورت دستی و با به‌کارگیری میله مدرج دستی انجام می‌شود. این کار با تعداد نمونه‌های بسیار محدود از هر هکتار انجام می‌شود که غالباً بعد از اتمام عملیات صورت می‌پذیرد که عملاً امکان اصلاح وجود ندارد. لذا با ساخت و به‌کارگیری سامانه سنجش عمق و با مشاهده لحظه‌ای عمق کار توسط اپراتور در صفحه نمایشگر و همزمان مشاهده آن توسط ناظر در سایت اینترنتی موردنظر امکان اصلاح کار در همان لحظه به‌سادگی ممکن خواهد بود. همچنین با استخراج داده‌های ثبت‌شده همراه با موقعیت مکانی از سامانه موردنظر، نقشه تغییرات عمق در سطح مزارع قابل‌مشاهده خواهد بود که جهت ارزیابی‌های بعدی ازجمله رصد عملکرد در نقاط با عمق کمتر و یا بیشتر می‌تواند مفید باشد.

یک پروژه تحقیقاتی با هدف طراحی و ساخت سیستم عمق‌سنجی و اندازه‌گیری مقاومت برشی در عملیات زیرشکنی انجام شد. در اجرای این پروژه از یک میکروکنترلر با چند ورودی داده از حسگرهای[2] خاصی که روی جک‌های زاویه و عمق زیرشکن بولدوزر نصب گردیده و یک سیستم موقعیت‌یاب مکانی جهت تعیین موقعیت نقاط اندازه‌گیری‌شده، استفاده گردید. در این پروژه با انتقال داده‌های به‌دست‌آمده از حداقل ۲۵۰۰ نقطه در یک مزرعه ۲۵ هکتاری نیشکر و تحلیل آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار نقشه توپوگرافی[3] ترسیم عملیات زیرشکنی در سطح مزرعه حاصل شد (Ahmadizadeh & Charaghi, 2017).

در تحقیقی اقدام به طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه کنترل خودکار موقعیت ادوات کشاورزی نسبت به سطح زمین گردید. این دستگاه، موقعیت مناسب ادوات کشاورزی را نسبت به سطح زمین در هر نقطه از زمین کشاورزی محاسبه می‌کند و سپس وسیله کشاورزی را در موقعیت بهینه قرار می‌دهد. موقعیت بهینه ادوات توسط نرم‌افزار نوشته شده برای دستگاه و با استفاده از داده‌های ورودی محاسبه می‌شود (Fallahikoshali, Aghkhani, & Bayati, 2014).

1- Sugarcane harvester

2- Sensors

3- Surfer software

طراحی و پیاده‌سازی سامانه تنظیم کشش الکتروهیدرولیکی برای تراکتور مسی فرگوسن با به‌کارگیری شیر کنترل الکترونیکی به‌عنوان هدف یک پروژه تحقیقاتی تعریف شد. در این تحقیق با به‌کارگیری شیر کنترل الکترونیکی اتصال سه نقطه جدید، سامانه کنترل کشش الکتروهیدرولیکی نصب شد. اجزای سامانه الکتروهیدرولیکی شامل حسگر نیروی کشش، شیر کنترل و نمایشگر می‌باشد. نتایج آزمون‌های کارگاهی نشان داد عملکرد سامانه در مورد عمق شخم در پاسخ به تغییرات پله‌ای نیروی کشش رضایت‌بخش بود و موقعیت گاوآهن متناسب با نیروی اعمال‌شده، تغییر داده شد (Moradinejad, 2017).

در پژوهشی به توسعه و ارزیابی عملکرد یک سامانه کنترل الکتریکی-هیدرولیکی برای زیرشکن با عمق متغیر پرداخته شد. بنابراین یک سیستم کنترل الکتریکی-هیدرولیکی برای زیرشکن به‌صورت انعطاف‌پذیر ساخته شد و یک روش جدید برای تشخیص عمق خاک‌ورزی توصیف شد. عملکرد سیستم کنترل الکتریکی-هیدرولیکی در آزمایش خاک با تشخیص قابل‌قبول دقت عمق خاک‌ورزی و کیفیت عملیات (یکنواختی توزیع عمق خاک‌ورزی و کاهش نیروی کششی) ارزیابی شد (Wang *et al.*, 2018).

حسگرهای لیزری برای تعیین مسافت و فاصله در بسیاری از پژوهش‌ها بکار رفته است. این حسگر برای شناسایی اشیاء بیشتر و نیز هرگونه مانع در مسیر ناوبری برای ربات انسان‌نما با موفقیت مورد ارزیابی قرار گرفت (Bonaiuto & Zanela, 2022). به دلیل هزینه کم و سهولت ساخت، حسگر ترکیبی متشکل از یک دوربین و یک فاصله‌یاب لیزری یک‌بعدی در زمینه هوافضا، برای رصد زمین و اکتشافات اعماق فضا مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌های شبیه‌سازی و آزمایش‌های داده‌های واقعی نشان داد که این روش در زمینه شناخت پدیده‌ها موفق بود (Tu *et al.*, 2022). حسگرهای فراصوتی[1] در شناخت وجود موانع در مسیر حرکت و نیز اندازه‌گیری فاصله‌ها کاربرد زیادی در وسایل نقلیه موتوری دارند (Carullo & Parvis, 2001). در زمینه کشاورزی یک سیستم با استفاده از حسگر فراصوتی برای ارزیابی عمق قرارگیری بذور در خاک توسعه یافت و عملکرد آن در شرایط مختلف از جمله در خاک خشک و مرطوب و نیز خاک صاف و ناهموار با نتایج رضایت‌بخش ارزیابی گردید (Kiani, Kamgar, & Raoufat, 2010).

براساس مرور منابع، عملیات کشاورزی و تردد ماشین‌ها در مزرعه موجب افزایش فشردگی خاک شده است. همچنین منابع بررسی‌شده بر بهبود عملکرد محصولات کشاورزی با انجام عملیات زیرشکنی دلالت می‌کند. ابزار و فنون مختلفی همچون الکتریکی، هیدرولیکی و انواع حسگرها برای اندازه‌گیری فاصله در زمینه‌های مختلفی توسعه یافته است که در این پژوهش ارزیابی استفاده از فنون و ابزار مرتبط برای اندازه‌گیری عمق مورد توجه قرار گرفته است.

به‌طور مشخص با توجه به اهمیت عملیات زیرشکنی در تهیه زمین نیشکر در استان خوزستان و نبود سامانه پایش برخط عمق این عملیات، این مطالعه با هدف مقایسه روش‌های مختلف اندازه‌گیری عمق و طراحی و ساخت یک سامانه سنجش مکانی عمق با درجه قابل‌قبول از اعتبار، براساس دقیق‌ترین روش، ارائه گردید.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۴۰۲ اجرا گردید. در این تحقیق توسعه یک سامانه سنجش عمق برای دستگاه زیرشکن متصل به بولدوزر که دستگاه اصلی زیرشکنی در مزارع نیشکر مورد توجه قرار گرفت. نمای زیرشکن متصل به بولدوزر در شکل ۱ نشان داده شده و مشخصات آن در جدول ۱ آمده است.

این پروژه در سه فاز طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه سنجش عمق زیرشکن برای محصول نیشکر برنامه‌ریزی شد. عملیات طراحی و ساخت سامانه در کارگاه فنی مرکز تحقیقات کشاورزی خوزستان، و ارزیابی مزرعه‌ای این سامانه در شرایط مزارع نیشکر شرکت کشت و صنعت امام خمینی (ره) واقع در منطقه شعیبیه شوشتر، صورت گرفت. در این پروژه سه روش عمق‌سنجی شامل روش عمق‌سنجی بر مبنای زوایای شاسی‌های محرک شاخه‌های زیرشکن، روش عمق‌سنجی بر پایه روش فاصله‌سنج لیزری و روش عمق‌سنجی بر مبنای روش فاصله‌سنج فراصوتی، برای ساخت سامانه مورد ارزیابی قرار گرفت.

در فاز طراحی سامانه، با توجه به تعریف سه روش عمق‌سنجی، روش زوایا، روش فاصله‌سنج لیزری و روش فاصله‌سنج فراصوتی، ابتدا ورودی‌ها و خروجی‌های مدارهای هریک از روش‌ها مشخص گردید (شکل ۲). برای مشخص کردن ورودی‌ها جهت محاسبه عمق در سه روش عمق‌سنجی، با دقت، کار زیرشکنی با بولدوزر و چگونگی تغییرات عمق آن مورد مشاهده قرار گرفت. برای این کار علاوه‌بر بازدید از عملیات زیرشکنی، تصویر و فیلم از این عملیات اخذ شد. با دقت در تصاویر و فیلم‌های زیرشکنی، زوایای موثر در تغییر عمق جهت روش عمق‌سنجی بر مبنای زوایا مشخص گردیده، و به‌عنوان ورودی این روش در نظر گرفته شدند. همچنین فاصله یا فواصل متغیری که می‌تواند در ارتباط با تغییر عمق موثر باشد، مشخص شده و به‌عنوان ورودی روش‌های عمق‌سنجی لیزری و فراصوتی تعریف گردیدند (شکل ۲). پس از این، روابط ریاضی سنجش عمق براساس این متغیرهای ورودی تعریف شد. همچنین کدنویسی این روابط و تعریف داده‌های ورودی و خروجی برای هر یک از روش‌ها در محیط برنامه C انجام گردید.

1- Ultrasonic sensors



الف- زیرشکن و بولدوزر خارج از مزرعه
A- The subsoiler and bulldozer outside the farm

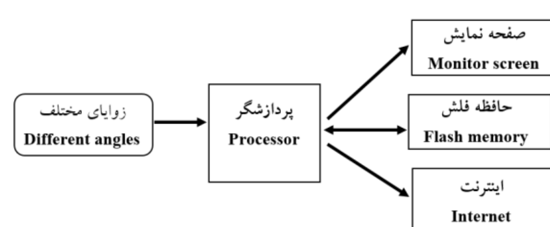


ب- زیرشکن و بولدوزر در حال انجام عملیات در مزرعه
B- The subsoiler and bulldozer on the farm

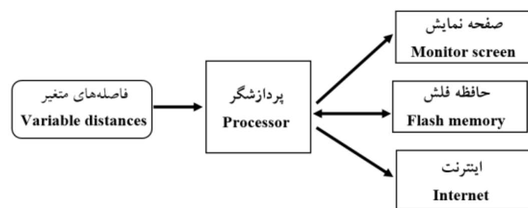
شکل ۱- نمایی از دستگاه زیرشکن متصل به بولدوزر
Fig.1. A view of the subsoiler device attached to the bulldozer

جدول ۱- مشخصات زیرشکن و بولدوزر این تحقیق
Table 1- Characteristics of subsoiler and bulldozer in this research

بولدوزر (Bulldozer)			زیرشکن (Subsoiler)					
مدل Model	توان موتور Engine power (hp)	تعداد جک‌های محرک زیرشکن The number of moving jacks of the subsoiler	عرض کار Working width (cm)	طول ناخن Nail length (cm)	عرض ناخن Nail width (cm)	تعداد شاخه (شنگ‌ها) The number of shanks	ارتفاع زیرشکن در حالت تراز The height in the level state (cm)	حداکثر عمق تئوری Maximum theoretical depth (cm)
D8N	306	4	330	51	9	3	168	130



الف- عمق‌سنجی با استفاده از روش زوایا
A- Depth measurement using angles technique



ب- عمق‌سنجی با استفاده از روش فاصله‌سنج لیزری و فراصوتی
B- Depth measurement using laser and ultrasonic distance measuring techniques

شکل ۲- شماتیک ورودی‌ها و خروجی‌های مدارهای مربوط به روش‌های مختلف عمق‌سنجی
Fig.2. Schematic of inputs and outputs of circuits related to different depth measurement techniques

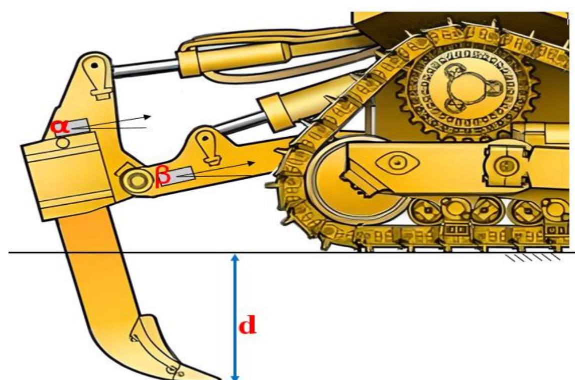
در هر سه روش عمق‌سنجی موقعیت‌یاب GPS تعریف شد تا علاوه بر نمایش عمق برای اپراتور بولدوزر، موقعیت جغرافیایی هر نقطه از اندازه‌گیری عمق ثبت شود. همچنین سامانه به فرستنده داده مجهز گردید و یک سایت خاص در اینترنت تعریف شد تا داده‌های عمق و موقعیت جغرافیایی به‌صورت برخط برای سایت مورد نظر ارسال شود و در دسترس کارشناسان ناظر قرار گیرد. علاوه بر این امکان ذخیره داده‌های عمق و موقعیت جغرافیایی در حافظه جانبی قابل حمل (کارت حافظه) سامانه در نظر گرفته شد تا در صورت وجود مشکل در ارسال برخط داده‌ها، با جابه‌جایی این حافظه، داده‌ها به رایانه‌های کارشناسان منتقل شود. سامانه به زمان‌سنج برای ثبت زمانی هر داده عمق مجهز گردید. همچنین در این سامانه امکان ورود شماره هر مزرعه و کد اپراتور فراهم شد تا عملیات زیرشکنی با دقت و نظارت مستند صورت گیرد. سامانه طوری طراحی شد که فاصله زمانی اخذ داده و ارائه عمق قابل‌تغییر باشد، اما به‌صورت پیش‌فرض،

فاصله زمانی ۵ ثانیه برای این سامانه تعریف گردید.

در روش عمق‌سنجی با به‌کارگیری روش زوایا، با توجه به مشاهده دقیق کار زیرشکنی، مشخص شد که کار تغییر عمق از جمله کاهش یا افزایش آن در دستگاه زیرشکن متصل به بولدوزر با تغییر زاویه چرخش شاسی نگهدارنده شاخه‌های زیرشکن (α) و نیز تغییر زاویه شاسی حامل شاخه‌ها (β) که ارتفاع آن‌ها را نسبت به سطح زمین کم و زیاد می‌کند، صورت می‌گیرد (شکل ۳-الف). بدین شکل که میزان عمق زیرشکن (d) با زاویه (α) رابطه عکس، و با زاویه (β) رابطه مستقیم دارد؛ به‌عبارتی افزایش زاویه (α) نسبت به افق باعث کاهش عمق، و در مقابل افزایش زاویه (β) نسبت به افق باعث افزایش عمق می‌شود. لذا رابطه عمق‌سنجی براساس روش زوایا، طبق رابطه (۱) تعریف شد که در آن هر یک از زوایا به‌وسیله حسگرهای زاویه‌سنج محاسبه می‌گردد:

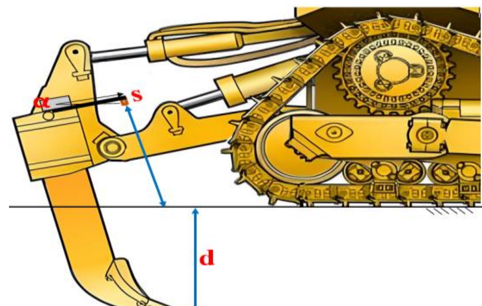
$$d = T(\alpha, \beta) \quad (۱)$$

در این رابطه d، عمق نفوذ زیرشکن در خاک (سانتی‌متر)؛ α، زاویه چرخش شاسی نگهدارنده شاخه‌های زیرشکن (درجه)؛ و β، زاویه شاسی حامل شاخه‌ها (درجه) می‌باشد.



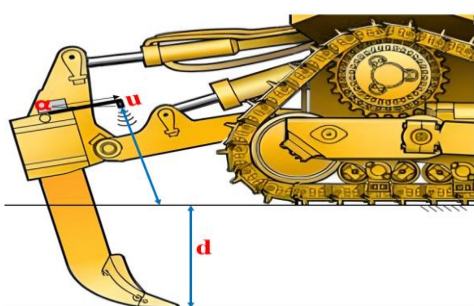
الف- سنجش عمق (d) با استفاده از حسگرهای زوایای شاسی‌ها نسبت به افق (α و β)

A- Measuring depth (d) with sensors based on the profiles' angle relative to the horizon (α and β)



ب- سنجش عمق (d) با استفاده از فاصله‌سنجی به‌وسیله حسگر لیزری (s) و زاویه این حسگر نسبت به افق (α)

B- Measuring depth (d) using distance measurement by a laser sensor (s) and the variable angle of the sensor relative to the horizon (α)



ج- سنجش عمق (d) با استفاده از فاصله‌سنجی به‌وسیله حسگر فراصوتی (u) و زاویه متغیر این حسگر نسبت به افق (α)

C- Measuring depth (d) using distance measurement by an ultrasonic sensor (u) and the variable angle of the sensor relative to the horizon (α)

شکل ۳- محل استقرار حسگرها و اجزای موثر در روش‌های مختلف عمق‌سنجی زیرشکن

Fig.3. The placement of sensors and effective elements in different subsoiler depth measurement techniques

در عمق‌سنجی با به‌کارگیری روش فاصله‌سنج لیزری و براساس مشاهده دقیق کار زیرشکنی، مشخص شد که علاوه بر فاصله (s)، فاصله شاسی نگهدارنده شاخه‌های زیرشکن نسبت به زمین که فاصله‌سنج لیزری نصب‌شده بر این شاسی محاسبه می‌کند، تغییر زاویه حسگر فاصله‌سنج نسبت به افق (α) نیز در میزان عمق تاثیر دارد (شکل ۳-ب). بدین شکل که میزان عمق زیرشکن (d) با زاویه حسگر فاصله‌سنج نسبت به افق (α) رابطه عکس، و همچنین با فاصله لیزری (s) نیز رابطه معکوس دارد؛ به‌عبارتی برای داشتن عمق بیشتر باید زاویه (α)، کمتر و نیز شاسی نگهدارنده نسبت به زمین، پایین‌تر قرار گیرد. بنابراین رابطه عمق‌سنجی براساس روش فاصله‌سنج لیزری، طبق رابطه (۲) تعریف شد که در آن فاصله مورد نظر به‌وسیله حسگر فاصله‌سنج لیزری و زاویه مذکور به‌وسیله حسگر

زاویه‌سنج محاسبه می‌گردد:

$$d= T (\alpha, s) \quad (۲)$$

در این رابطه d، عمق نفوذ زیرشکن در خاک (سانتی‌متر)؛ α، زاویه حسگر فاصله‌سنج نسبت به افق (درجه)؛ و s، فاصله حسگر لیزری تا سطح رویی خاک (سانتی‌متر) که توسط این حسگر محاسبه شده، می‌باشد.

همچنین در عمق‌سنجی با به‌کارگیری روش فاصله‌سنج فراصوتی همانند روش فاصله‌سنج لیزری، مشخص گردید فاصله (u)، فاصله شاسی نگهدارنده شاخه‌های زیرشکن نسبت به زمین که فاصله‌سنج فراصوتی نصب‌شده بر این شاسی محاسبه می‌کند و نیز زاویه حسگر فاصله‌سنج نسبت به افق، در تغییر عمق زیرشکن دخیل هستند (شکل ۳-ج). بدین شکل که میزان عمق زیرشکن (d) با زاویه حسگر فاصله‌سنج نسبت به افق (α)، رابطه عکس و همچنین با فاصله فراصوتی (u) نیز رابطه معکوس دارد؛ به‌عبارتی برای داشتن عمق بیشتر باید زاویه (α)، کمتر و نیز شاسی نگهدارنده نسبت به زمین، پایین‌تر قرار گیرد. در نتیجه رابطه عمق‌سنجی براساس روش فاصله‌سنج فراصوتی، به شکل رابطه (۳) تعریف شد که در آن فاصله مورد نظر به‌وسیله حسگر فاصله‌سنج فراصوتی و زوایه مذکور به‌وسیله حسگر زاویه‌سنج محاسبه می‌گردد:

$$d= T (\alpha, u) \quad (۳)$$

در این رابطه d، عمق نفوذ زیرشکن در خاک (سانتی‌متر)؛ α، زاویه حسگر فاصله‌سنج نسبت به افق (درجه)؛ و u، فاصله حسگر فراصوتی تا سطح رویی خاک (سانتی‌متر) که توسط این حسگر محاسبه شده، می‌باشد.

در فاز ساخت سامانه، پس از طراحی مدار برای هر یک از سه روش عمق‌سنجی، نیازهای سخت‌افزاری آن‌ها از جمله کارت حافظه، موقیت‌یاب GPS، حسگرهای زاویه‌سنج، حسگر سنجش فاصله لیزری، حسگر سنجش فاصله فراصوتی و اتصالات و تبدیلات مربوطه تهیه شد و براساس نقشه مدارها عملیات بستن مدار صورت گرفت. البته ابتدا به‌صورت جداگانه کارایی هریک از حسگرها مورد آزمون قرار گرفت و بعد از اطمینان از میزان صحت هریک از حسگرها، در مدار قرار داده شدند. به‌عبارتی علاوه بر انتخاب حسگرها از برندهای معتبر، برای ارزیابی سالم و دقیق بودن هریک از آن‌ها، حسگرهای زاویه‌سنج با مقایسه با زوایای ثابت گونیا همچون ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه، و حسگرهای فاصله‌سنج لیزری و فراصوتی با مقایسه با چند فاصله مشخص خط‌کش مدرج، آزمون شدند.

مکان جای‌گذاری اجزای مدارها و موقعیت آن‌ها ازجمله جعبه‌های حسگرهای‌های زاویه‌سنج، فاصله‌سنج لیزری و نیز فاصله‌سنج فراصوتی روی دستگاه زیرشکن و نیز جعبه‌های پردازشگر و نیز نمایشگر بر روی بولدوزر، براساس شکل و ابعاد زیرشکن و بولدوزر انتخاب گردید. ایمنی و سهولت نصب حسگرها و نیز امکان تنظیمات نیز در این مساله در نظر گرفته شد. جعبه‌ها طوری انتخاب شدند که نسبت به ورود آب و گرد و خاک و نیز ضربه‌های احتمالی مقاوم باشند و لذا با اطمینان، مدارهای الکترونیکی ازجمله مدار حسگرها، پردازشگر و نیز نمایشگر در این جعبه‌ها جای‌گذاری گردید.

اجزای روش عمق‌سنجی بر مبنای زوایا، شامل دو حسگر زاویه‌سنج که در هریک از آن‌ها حسگرهای زاویه‌سنج و اتصالات مربوطه وجود دارد، مدار اصلی پردازشگر، و صفحه نمایش عمق برای اپراتور است (شکل ۴-الف). اجزای روش عمق‌سنجی لیزری نیز شامل یک حسگر زاویه‌سنج که در آن حسگر زاویه‌سنج و اتصالات مربوط به آن وجود دارد، حسگر فاصله‌سنج لیزری و اتصالات آن، مدار اصلی پردازشگر و صفحه نمایش عمق برای اپراتور، می‌باشد (شکل ۴-ب). اجزای روش عمق‌سنجی فراصوتی همانند فاصله‌سنج لیزری بوده با این تفاوت که به‌جای حسگر فاصله‌سنج لیزری، حسگر فاصله‌سنج فراصوتی، وجود دارد (شکل ۴-ج).

مکان نصب هریک از اجزای روش‌ها روی زیرشکن و بولدوزر طوری انتخاب گردید که کمترین آسیب و احتمال ضربه را داشته باشند و همچنین برای دسترسی برای نصب، ایمن و راحت باشند. همچنین با تعبیه کردن صفحات فلزی پیچ‌دار[1]، امکان باز کردن اجزا در فصل غیرکاری به‌سادگی ایجاد گردید.

در روش‌های عمق‌سنجی لیزری و فراصوتی، با توجه به این‌که این حسگرها باید در جایی مستقر شوند که صرفاً فاصله با سطح خاک را اندازه بگیرند و با هر نوع تغییر زوایای شاسی‌ها، تماس پرتو این حسگرها باید فقط با سطح خاک باشد و هیچ‌گونه برخوردی با قطعات زیرشکن حادث نشود تا خطاهای متاثر از این مساله به صفر برسد، بوم‌نگهدارنده‌ای برای منظور ساخته شد (بخش h در قسمت‌های ب و ج شکل ۴). این بوم، حسگرهای لیزری و فراصوتی را در هر شرایطی، در جایی‌که هیچ‌گونه برخوردی از پرتو این حسگرها با چیزی غیر از سطح خاک وجود نداشته باشد، نگه داشته است.

یادآور می‌شود برای هریک از حسگرهای زاویه‌سنج از حسگر مدل MPU-6500 ساخت شرکت چینی Microdevices استفاده شد. با استفاده از این حسگر می‌توان شتاب خطی و زاویه‌ای یک جسم را در سه محور مختصاتی (X, Y, Z) تعیین کرد. برای اندازه‌گیری فاصله به روش فراصوتی، از حسگر مدل SRF02 استفاده شد. این حسگر ساخت کارخانه چینی Robot Electronics می‌باشد. همچنین برای اندازه‌گیری فاصله به روش لیزری از حسگر چینی مدل LS-03T استفاده گردید. نوع لیزر آن مرئی قرمز با طول موج ۶۳۵ نانومتر می‌باشد.

1- Base plate



الف- سامانه ساخته‌شده بر پایه روش زوایا؛ (α و β): حسگرهای زوایای شاسی‌ها و (P): پردازشگر همراه با نمایشگر

A- The system constructed for the angles technique; (α and β): the angles sensors of the profiles, and (P): the processor with the monitor



ب- سامانه ساخته‌شده بر پایه روش لیزری؛ (α): حسگر زاویه بوم نگهدارنده حسگر لیزری نسبت به افق، (s): حسگر لیزری، (h): بوم نگهدارنده حسگر و (P): پردازشگر همراه با نمایشگر

B- The system constructed for the laser technique; (α): the angle sensor of the laser sensor holder relative to the horizon, (s): laser sensor, (h): holder boom, and (P): the processor with the monitor



ج- سامانه ساخته‌شده بر پایه روش فراصوتی؛ (α): حسگر زاویه بوم نگهدارنده حسگر فراصوتی نسبت به افق، (u): حسگر فراصوتی، (h): بوم نگهدارنده حسگر و (P): پردازشگر همراه با نمایشگر

C- The system constructed for the ultrasonic technique; (α): the angle sensor of the ultrasonic sensor holder relative to the horizon, (u): ultrasonic sensor, (h): holder boom, and (P): the processor with the monitor

شکل ٤- تصاویر ساخت سامانه بر پایه روش‌های مختلف عمق‌سنجی

Fig.4. Images of the construction of the system based on different depth measurement techniques

به‌منظور تعیین موقعیت دقیق مکانی از حسگر موقعیت‌یاب GPS مدل Ublox Neo M8N استفاده شد. این حسگر ساخت شرکت Unblox آلمان می‌باشد. برای ارسال داده‌ها همچون عمق اندازه‌گیری‌شده، موقعیت مکانی و زمان اندازه‌گیری، از فرستنده GPRS SIM800C استفاده شد. این فرستنده از مهم‌ترین و پرکاربردترین فرستنده‌های مخابراتی مبتنی بر سیم‌کارت به حساب می‌آید و توسط کمپانی چینی SIMCOM طراحی و عرضه شده است.

فاز ارزیابی سامانه، در دو مرحله قرارگیری روی سکوی ثابت و حرکت در شرایط مزرعه انجام شد. در مرحله استفاده از سکوی ثابت، بولدوزر و زیرشکن همراه با سامانه متصل به آن روی سکوی بلند قرار داده شدند و میانگین قدر مطلق تفاوت بین عمق‌های مبنا (واقعی) و عمق‌های منتج از سامانه جهت صحت‌سنجی اولیه محاسبه گردید تا ایرادات مربوط به ورودی‌ها، کدنویسی و یا مشکل سخت‌افزاری مرتفع گردد. در این مرحله عمق اولیه ۵ سانتی‌متر و ۹ عمق با فاصله ۱۰ سانتی‌متر (از ۱۰ تا ۹۰ سانتی‌متر) به‌عنوان ده عمق مبنا در نظر گرفته شدند.

برای اجرای مرحله ارزیابی در شرایط حرکت در مزرعه، از طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی به روش کرت‌های یک بار خردشده با سه تکرار استفاده شد. کرت‌های اصلی شامل روش‌های عمق‌سنجی سامانه در هنگام زیرشکنی در سه سطح روش‌های عمق‌سنجی بر مبنای زوایای شاسی‌های محرک شاخه‌های زیرشکن، روش فاصله‌سنج لیزری و روش فاصله‌سنج فراصوتی و کرت‌های فرعی شامل دامنه‌های مختلف عمق در سه سطح عمق ۳۰-۰، ۶۰-۳۰، ۹۰-۶۰ سانتی‌متری بودند. در واقع انتظار می‌رفت که روش‌های مختلف عمق‌سنجی با توجه به حسگرهای متفاوت آن‌ها می‌توانند از

نظر میزان دقت اندازه‌گیری عمق اختلاف داشته باشند و نیز با توجه به شرایط کار از نظر میزان کشش و لرزش دستگاه در عمق‌های مختلف، دقت اندازه‌گیری در دامنه‌های عمق کار نیز متفاوت باشد، لذا ارزیابی این سه روش و در سه دامنه مختلف عمق مورد توجه قرار گرفت.

طول هر کرت برای رسیدن زیرشکن به دامنه عمق مورد نظر و نیز اخذ نمونه‌های کافی ۱۰۰ متر در نظر گرفته شد. در این حالت و جهت بررسی رسیدن زیرشکن به دامنه عمق مورد نظر، میله مدرج ملاک قرار گرفت. همچنین عرض کرت‌ها جهت جلوگیری از خطای هم‌پوشانی کرت‌ها با توجه به انحراف به راست یا چپ بولدوزر، کمی بیش از عرض کار زیرشکن و به میزان ۶ متر لحاظ شد.

شاخص مورد ارزیابی در این پروژه، عمق زیرشکنی است. جهت بررسی میزان دقت و ارزیابی روش‌های مختلف سامانه، در طول انجام عملیات، هم‌زمان میزان عمق اندازه‌گیری‌شده توسط سامانه و نیز عمق میله مدرج دستی ثبت گردید. برای هر کرت ۳۰ زوج عمق سامانه و میله مدرج ارزیابی شد. ابتدا تفاوت متناظر عمق‌های موردنظر در هر نقطه مکانی بین سامانه و میله مدرج دستی به‌صورت قدر مطلق به‌دست آمده و سپس شاخص‌های آماری میانگین، انحراف معیار، حداقل و حداکثر خطاهای عمق برای هر کرت محاسبه شدند. در نهایت با توجه به طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی به روش کرت‌های یک بار خرده‌شده، داده‌های شاخص‌های آماری ذکرشده توسط نرم‌افزار MSTATC تجزیه و تحلیل شدند. همچنین میانگین صفات به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن مورد مقایسه قرار گرفتند.

روش اندازه‌گیری شاخص‌ها

میانگین خطاهای عمق

میانگین (رابطه ۴)، یکی از شاخص‌های مرکزی در آمار است که نماینده‌ای از مجموع داده‌ها است که اگر به‌جای تک تک داده‌ها آن را ارائه دهیم در مجموع ارائه‌شده چیزی تغییر نمی‌کند. در این پروژه میانگین قدر مطلق اختلاف بین عمق‌های متناظر سامانه و میله مدرج در هر کرت موردنظر است. لذا با استفاده از این شاخص آماری میانگین خطاهای عمق برای روش‌های عمق‌سنجی در دامنه‌های مختلف عمق قابل استخراج و مقایسه خواهد بود.

$$\bar{d} = \frac{d_1 + d_2 + \cdots + d_n}{n} \qquad (۴)$$

در این رابطه $\bar{d}$، میانگین قدر مطلق تفاوت عمق‌های متناظر سامانه و میله مدرج (سانتی‌متر)؛ d_1، d_2، ... و d_n، قدر مطلق تفاوت عمق‌های سامانه و میله مدرج در نقاط مختلف هر کرت (سانتی‌متر)؛ و n، تعداد نمونه‌های هر کرت می‌باشد.

انحراف معیار خطاهای عمق

انحراف معیار (رابطه ۵)، یکی از شاخص‌های پراکندگی است که نشان می‌دهد به‌طور متوسط داده‌ها چه مقدار از میانگین فاصله دارند. اگر انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌ها، نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند؛ در حالی‌که انحراف معیار بزرگ بیانگر پراکندگی قابل‌توجه داده‌ها می‌باشد. در این پروژه انحراف معیار قدر مطلق تفاوت بین عمق‌های متناظر سامانه و میله مدرج برای هر کرت مورد نظر است. با استفاده از این شاخص آماری میزان انحراف معیار خطاهای عمق برای روش‌های عمق‌سنجی در دامنه‌های مختلف عمق، نسبت به میانگین، قابل استخراج و مقایسه خواهد بود.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(d_i - \bar{d})^2}{n}} \qquad (۵)$$

در این رابطه S، انحراف معیار قدر مطلق تفاوت عمق‌های متناظر سامانه و میله مدرج (سانتی‌متر)؛ $\bar{d}$، میانگین قدر مطلق تفاوت عمق‌های متناظر سامانه و میله مدرج (سانتی‌متر)؛ d_i، قدر مطلق تفاوت عمق‌های سامانه و میله مدرج در نقاط مختلف (سانتی‌متر)؛ و n، تعداد نمونه‌های هر کرت می‌باشد.

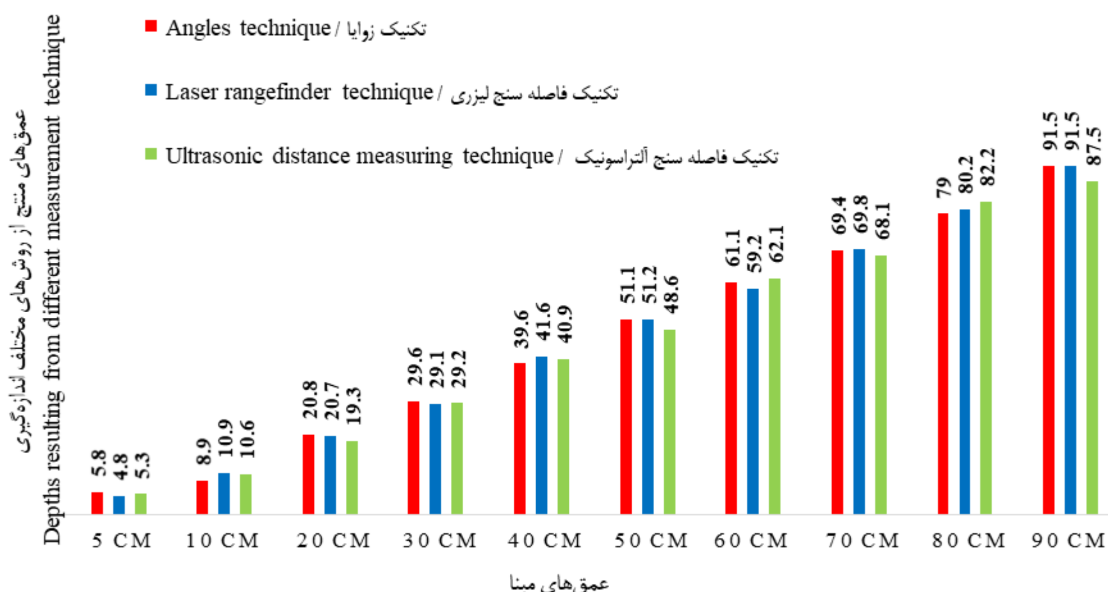
حداقل و حداکثر خطاهای عمق

حداقل و حداکثر داده‌ها دو مورد از شاخص‌های پراکندگی هستند که دامنه تغییرات داده‌ها را نشان می‌دهند. در این پروژه حداقل و حداکثر قدر مطلق اختلاف بین عمق‌های متناظر سامانه و میله مدرج برای هر کرت مورد نظر می‌باشد. این دو شاخص از این نظر مهم است که نشان می‌دهد بهترین دقت هر یک از روش‌های مورد ارزیابی و در دامنه‌های مختلف عمق مورد نظر چقدر است و همچنین حداکثر خطای آن‌ها چه میزان است. لذا کارشناسان با توجه به این شاخص‌ها می‌توانند دامنه تغییرات محتمل داده‌های ثبت‌شده را به‌دست بیاورند و قضاوت مستندی برای کل داده‌ها داشته باشند.

نتایج و بحث

ارزیابی سامانه روی سکوی ثابت

نتایج مربوط به ارزیابی صحت‌سنجی اولیه سامانه روی سکوی ثابت، بعد از چندین بار ارزیابی و رفع عیب‌های صورت‌گرفته، نشان داد که عمق‌های منتج از روش‌های مختلف عمق‌سنجی نزدیک به عمق‌های مبنای مورد ارزیابی می‌باشند. میانگین قدر مطلق تفاوت بین عمق‌های مبنا و سامانه به‌ترتیب ۰/۸۸، ۰/۸۲ و ۱/۳۴ سانتی‌متر برای روش‌های زوایا، لیزری و فراصوتی به‌دست آمد (شکل ۵).



شکل ۵- صحت‌سنجی سامانه بر روی سکوی ثابت
Fig.5. System calibration on a fixed platform

ارزیابی سامانه در شرایط مزرعه

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به ارزیابی سامانه در شرایط حرکت در مزرعه نشان داد که تمام شاخص‌های آماری خطای عمق شامل میانگین، انحراف معیار، حداقل و نیز حداکثر خطا در اثر نوع روش عمق‌سنجی معنی‌دار بود، همچنین همه این شاخص‌ها در اثر دامنه‌های مختلف عمق نیز معنی‌دار بودند، اما فقط شاخص‌های آماری حداقل و حداکثر خطا در اثر متقابل دو عامل اختلاف معنی‌داری نشان دادند (جدول ۲). در همه شاخص‌های آماری موردارزیابی روش زوایا کمترین مقادیر خطا را به خود اختصاص داد، و در مقابل، به‌جز شاخص حداقل خطا، که حداکثر آن متعلق به روش لیزری بود، در سایر شاخص‌ها روش فراصوتی بیشترین خطا را کسب نمود (جدول ۳). به‌طور کلی روش‌های عمق‌سنجی لیزری و فراصوتی در همه شاخص‌ها نسبت به روش زوایا خطای بیشتری داشتند و این می‌تواند مربوط به خطاهای ناشی از شرایط مزرعه باشد به‌طوری‌که حسگرهای فاصله‌سنج لیزری و فراصوتی موجود در این دو روش در هنگام برخورد کردن پرتو حسگرها به کلوخه‌ها عدد فاصله کمتر و در برخورد به گودی‌های عدد فاصله بیشتر را نشان می‌دهند و لذا در مجموع، میزان خطا زیاد می‌شود. همچنین دقت کمتر روش فراصوتی نسبت به روش لیزری را می‌توان به ماهیت حسگر فراصوتی نسبت داد. به‌عبارتی در آزمون کارآیی حسگر فراصوتی مشخص شد که اگر زاویه پرتو آن بیشتر از ۳۵ درجه باشد، خطای زیادی در اندازه‌گیری فاصله در آن مشاهده می‌شود و اگرچه در هنگام انجام عملیات زیرشکنی، زاویه موقعیت این حسگر به ۳۵ درجه نمی‌رسد ولی احتمالا در هنگام کار و تغییر عمق و نیز لرزش‌های محتمل، مقادیر زاویه بیشتر رخ داده و در نتیجه در مجموع روی خطا اثر گذاشته است. البته همان‌طور که ذکر شد در مورد شاخص حداقل خطا روش فراصوتی با تفاوت ناچیزی بهتر از روش لیزری بود (جدول ۳)؛ به‌عبارتی حداقل خطا در شرایط ایده‌آل و بدون لرزش دستگاه و نیز در حالت عدم افزایش غیرمعمول زوایا رخ داده است و لذا نتیجه به‌دست‌آمده منطقی به نظر می‌رسد. همچنین تمام شاخص‌های خطای عمق در هر سه روش عمق‌سنجی مورد ارزیابی با افزایش عمق کار سامانه کاهش یافته است (جدول ۳) و این می‌تواند مربوط به کاهش لرزش دستگاه زیرشکن در عمق‌های بیشتر، و کم شدن خطاهای ناشی از لرزش‌ها باشد.

میانگین خطاهای عمق

مقایسه میانگین شاخص‌های آماری موردارزیابی نشان داد که در بین روش‌های عمق‌سنجی، روش زوایا با ۱/۹۱ سانتی‌متر و روش فراصوتی با ۳/۸۳ سانتی‌متر به‌ترتیب کمترین و بیشترین میانگین خطای عمق را کسب نمودند. در بین دامنه‌های عمق نیز کمترین و

بیشترین میانگین خطای عمق، به‌ترتیب در دامنه عمیق با ۲/۳۳ سانتی‌متر، و در دامنه سطحی با ۳/۶۵ سانتی‌متر به‌دست آمد (جدول ۳). همچنین مقایسه میانگین اثر متقابل دو عامل روش عمق‌سنجی و دامنه عمق نشان داد که کمترین و بیشترین مقادیر میانگین خطای عمق به‌ترتیب به روش زوایا و دامنه عمیق با ۱/۲۷ و روش فراصوتی و دامنه سطحی با ۴/۵۱ سانتی‌متر تعلق داشت (شکل ۶). با توجه به شکل ۶ میانگین خطاهای عمق که مهم‌ترین و گویاترین شاخص ملموس در این مطالعه است در هر سه روش با افزایش عمق، کمتر می‌شود و همچنین کمترین میزان میانگین خطا به‌ترتیب به روش‌های زوایا، لیزری و فراصوتی تعلق داشت. البته دلایل این موارد در بالا به‌طور کامل شرح داده شد، اما در این شکل این روند در همه روش‌ها و در عمق‌های مختلف به‌وضوح قابل‌مشاهده است که این مساله می‌تواند دلیلی بر قوت نتایج به‌دست‌آمده باشد.

جدول ۲– تجزیه واریانس میانگین مربعات (MS) شاخص‌های خطای اندازه‌گیری عمق

Table 2- Analysis of mean square (MS) variance of depth measurement error indices

منابع تغییرات Sources of variations		درجه آزادی Degree of freedom	میانگین خطای عمق Mean depth errors	انحراف معیار خطای عمق Standard deviation of depth error	حداقل خطای عمق Minimum of depth error	حداکثر خطای عمق Maximum of depth error
بلوک	Block	2	0.61	0.04	0.006	5.19
روش عمق‌سنجی (T)	Depth measuring technique (T)	2	8.32**	1.91**	0.028**	23.58**
خطای a	Error a	4	0.03	0.01	0.001	0.69
دامنه‌های عمق (R)	Depth range (R)	2	4.21**	0.54**	0.071**	11.61**
اثر متقابل (T*R)	Interaction (T*R)	4	0.04	0.04	0.002**	0.08**
خطای b	Error b	12	0.02	0.03	0.001	0.02
ضریب تغییرات (٪)	Coefficient of variations (%)		5.1	18.3	2.2	2.61

* و **: به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

* and **: Significant at 5%, and 1% probability levels, respectively

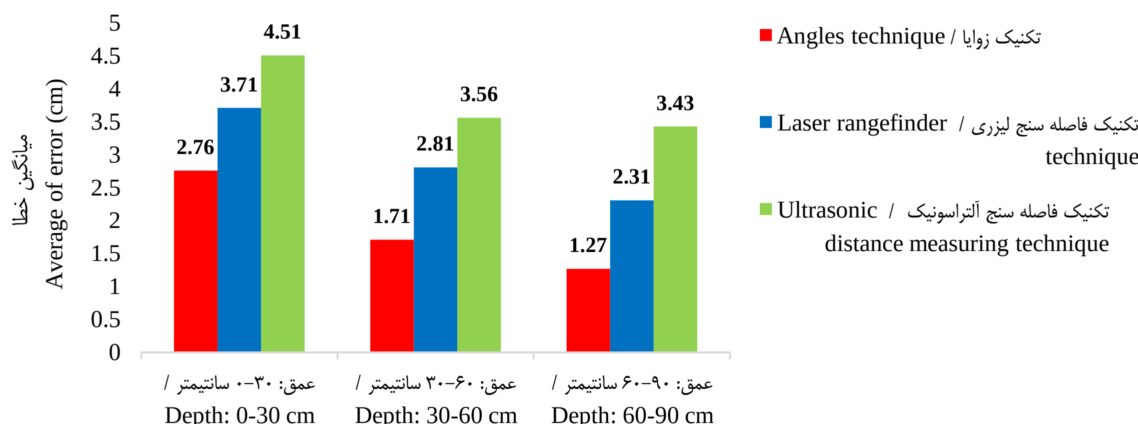
جدول ۳– مقایسه میانگین شاخص‌های خطای اندازه‌گیری عمق*

Table 3- The means comparison of depth measurement error indices*

تیمار Treatment	میانگین خطای عمق Mean depth error (cm)	انحراف معیار خطای عمق Standard deviation of depth error (cm)	حداقل خطای عمق Minimum of depth error (cm)	حداکثر خطای عمق Minimum of depth error (cm)
روش عمق‌سنجی **Depth measuring technique (T)**				
زوایا Angles (T_1)	1.91 c	0.53 c	0.12 b	4.49 b
لیزری Laser (T_2)	2.93 b	1.03 b	0.22 a	5.48 b
فراصوتی Ultrasonic (T_3)	3.83 a	1.46 a	0.21 a	7.66 a
دامنه عمق **Depth range (R) (cm)**				
0-30 (R_1)	3.65 a	1.29 a	0.28 a	6.97 a
30-60 (R_2)	2.69 b	0.89 b	0.17 b	5.96 b
60-90 (R_3)	2.33 c	0.83 b	0.11 c	4.71 c

*در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، در سطح ۵ درصد احتمال تفاوت معنی‌داری ندارند.

*In each column, the averages that have common letter(s) do not differ significantly at the 5% level.



شکل ٦– مقایسه میانگین خطاهای عمق مربوط به اثر متقابل روش‌های مختلف عمق‌سنجی و دامنه‌های متفاوت عمق

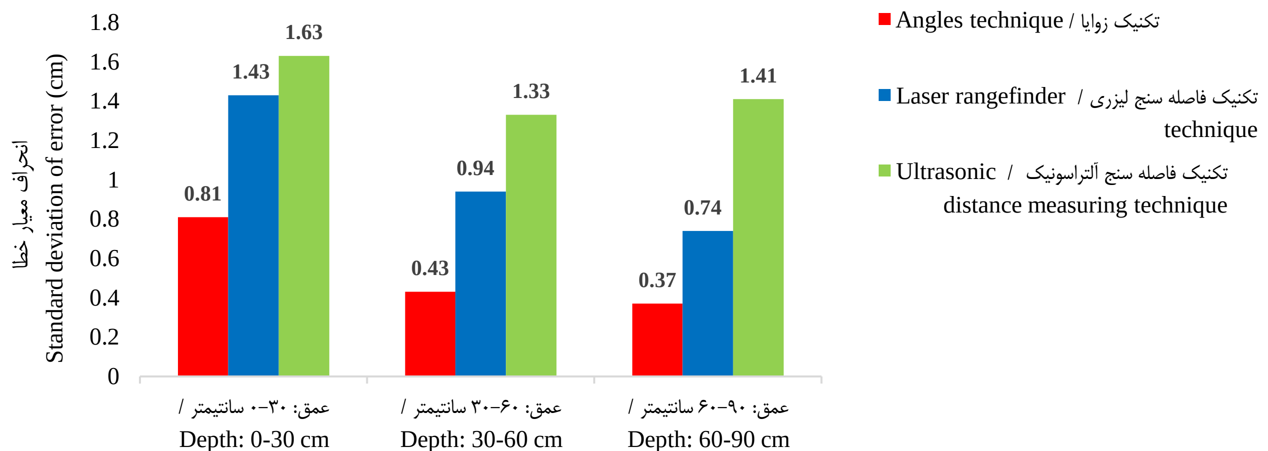
Fig.6. The comparison the average of depth errors related to the interaction effect of different depth measurement techniques and different depth ranges

نتایج پروژه کنترل خودکار عمق دستگاه زیرشکن، بر روند کلی کاهش خطای اندازه‌گیری عمق با افزایش عمق کار دستگاه دلالت می‌کند که با نتایج این تحقیق مشابهت دارد (Fallahikoshali *et al.*, 2014). در پروژه مذکور ارزیابی‌ها با فاصله‌های ۵ سانتی‌متر (از ۰–۵ تا ۳۵–۳۰) انجام شده است. همچنین در آن پروژه برای اندازه‌گیری عمق از یک پتانسیومتر، براساس چرخش پتانسیومتر در اثر تغییر عمق زیرشکن و در نتیجه تغییر ولتاژ، استفاده شده است. در پروژه تحقیقاتی طراحی عمق‌سنج برای گاوآهن برگردان‌دار (Alimardani, Shahrbanunjad, & Borghee, 1998)، میانگین قدرمطلق خطا ۱/۱ سانتی‌متر در شرایط کار در مزرعه گزارش شده است. در پروژه مورد اشاره صرفاً چهار سطح ثابت شامل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متری به‌عنوان مبنا مورد ارزیابی قرار گرفته و میانگین قدرمطلق خطا به‌ترتیب ۱/۶، ۰/۷، ۱ و ۱ سانتی‌متر برای این سطوح بوده است. ساخت عمق‌سنج در آن پروژه نیز با استفاده از پتانسیومتر و تغییرات ولتاژ انجام شده است. لذا اختلاف نتایج دو پروژه اخیر با پروژه جاری بیشتر می‌تواند به روش‌های متفاوت مورد استفاده، مرتبط باشد. همچنین در پروژه جاری، عمق در دامنه بزرگتر و تا ۹۰ سانتی‌متری مورد ارزیابی قرار گرفته است. در پروژه تحقیقاتی ارزیابی خودکار عمق زیرشکنی و با به‌کارگیری حسگر فراصوتی میانگین خطا ۸/۲۸ درصد، معادل ۳/۱ سانتی‌متر، گزارش شد (Lou *et al.*, 2021). البته در تحقیق مذکور عمق مورد ارزیابی حداکثر تا ۴۰ سانتی‌متری بوده و نتایج آن قابل مقایسه با دقت ۴/۵۱ و ۳/۵۶ سانتی‌متری مربوط به دامنه سطحی و میانه این پروژه است (شکل ۶). در پروژه تحقیقاتی برای اندازه‌گیری عمق با استفاده از دو حسگر شیب‌سنج (زاویه‌سنج) نصب‌شده بر شاسی اصلی زیرشکن و چرخ الحاقی، دقت ارزیابی عمق زیرشکن ۳/۲ و ۱/۹ درصد (۰/۸ و ۰/۵۷ سانتی‌متر) به‌ترتیب برای دو عمق مبنای ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متری گزارش شده است (Wang *et al.*, 2018). نتایج پروژه مذکور را می‌توان با دقت ۲/۷۶ سانتی‌متر روش زوایا در محدوده سطحی این پروژه مقایسه نمود (شکل ۶). اگرچه در پروژه جاری عمق در دامنه سطحی از صفر تا ۳۰ سانتی‌متر متغیر است در حالی‌که در پروژه مورد اشاره صرفاً محدوده نزدیک به ۲۵ و نیز ۳۰ سانتی‌متر ملاک قرار گرفته است.

انحراف معیار خطاهای عمق

مقایسه میانگین شاخص‌های آماری مورد ارزیابی نشان داد که در بین روش‌های عمق‌سنجی، روش زوایا با ۰/۵۳ سانتی‌متر و روش فراصوتی با ۱/۴۶ سانتی‌متر به‌ترتیب کمترین و بیشترین انحراف معیار خطای عمق را کسب نمودند. در بین دامنه‌های عمق نیز کمترین و بیشترین انحراف معیار خطای عمق، به‌ترتیب در دامنه عمیق با ۰/۸۳ سانتی‌متر و در دامنه سطحی با ۱/۲۹ سانتی‌متر به‌دست آمد (جدول ۳). همچنین مقایسه میانگین اثر متقابل دو عامل روش عمق‌سنجی و دامنه عمق نشان داد که کمترین و بیشترین مقادیر انحراف معیار خطای عمق به‌ترتیب به روش زوایا و دامنه عمیق با ۰/۳۷ و روش فراصوتی و دامنه سطحی با ۱/۶۳ سانتی‌متر تعلق داشت (شکل ۷). همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود انحراف معیار خطا با افزایش عمق، کمتر می‌شود و نیز کمترین میزان انحراف معیار خطا به‌ترتیب به روش‌های زوایا، لیزری و فراصوتی تعلق داشت، همچنین روند یک‌دست تغییرات مربوط به انحراف معیار خطا به‌وضوح در همه روش‌ها و در عمق‌های مختلف مشاهده می‌شود. در واقع انحراف معیار خطا همانند میانگین خطا از یک روند مشابه تبعیت کرده‌اند و همخوانی تغییرات انحراف معیار و میانگین علاوه‌بر متاثر بودن از اخذ داده‌های زیاد در این پروژه که باعث افزایش دقت شده، نشان می‌دهد

که تاثیر خطاهای زیاد و غیرمترقبه در کل پروژه بسیار ناچیز بوده است.



شکل ۷- مقایسه انحراف معیار خطاهای عمق مربوط به اثر متقابل روش‌های مختلف عمق‌سنجی و دامنه‌های متفاوت عمق

Fig.7. The comparison the standard deviation of depth errors related to the interaction effect of different depth measurement techniques and different depth ranges

حداقل خطاهای عمق

مقایسه میانگین شاخص‌های آماری مورد ارزیابی نشان داد که در بین روش‌های عمق‌سنجی، روش زوایا با ۰/۱۲ سانتی‌متر و روش لیزری با ۰/۲۲ سانتی‌متر به‌ترتیب کمترین و بیشترین حداقل خطای عمق را کسب نمودند. در بین دامنه‌های عمق نیز کمترین و بیشترین حداقل خطاهای عمق، به‌ترتیب در دامنه عمیق با ۰/۱۱ سانتی‌متر و در دامنه سطحی با ۰/۲۸ سانتی‌متر به‌دست آمد (جدول ۳). همچنین مقایسه میانگین اثر متقابل دو عامل روش عمق‌سنجی و دامنه عمق نشان داد که کمترین و بیشترین مقادیر حداقل خطا به‌ترتیب به روش زوایا و دامنه عمیق با ۰/۰۵ و روش فراصوتی و دامنه سطحی با ۰/۳۴ سانتی‌متر تعلق داشت (شکل ۸). حداقل خطا اگرچه به نظر می‌رسد یک اتفاق باشد اما با توجه به تکرارهای صورت‌گرفته و گزارش میانگین آن‌ها، این اتفاق به‌عنوان نتیجه قابل بحث می‌شود. در واقع روند تغیرات یک‌دستی که در میانگین و انحراف معیار دیده شده، در حداقل خطا، فقط در روش فراصوتی دچار به‌هم‌ریختگی شده است، بدین شکل که در دو دامنه عمق میانه و عمیق، روش فراصوتی از نظر حداقل خطا کمتر از روش لیزری بود، البته اعداد بسیار نزدیک بوده و در دامنه میانه ۰/۱۸ در مقابل ۰/۲۲ و در دامنه عمیق ۰/۱۲ در مقابل ۰/۱۵ به‌ترتیب برای روش‌های فراصوتی و لیزری است (شکل ۸). لذا به نظر می‌رسد که این می‌تواند به ماهیت حسگر فاصله‌سنج فراصوتی و دقت آن نسبت به فاصله‌سنج لیزری باشد که این اعداد در شرایط حداقل لرزش و ثبات دستگاه صورت گرفته است.

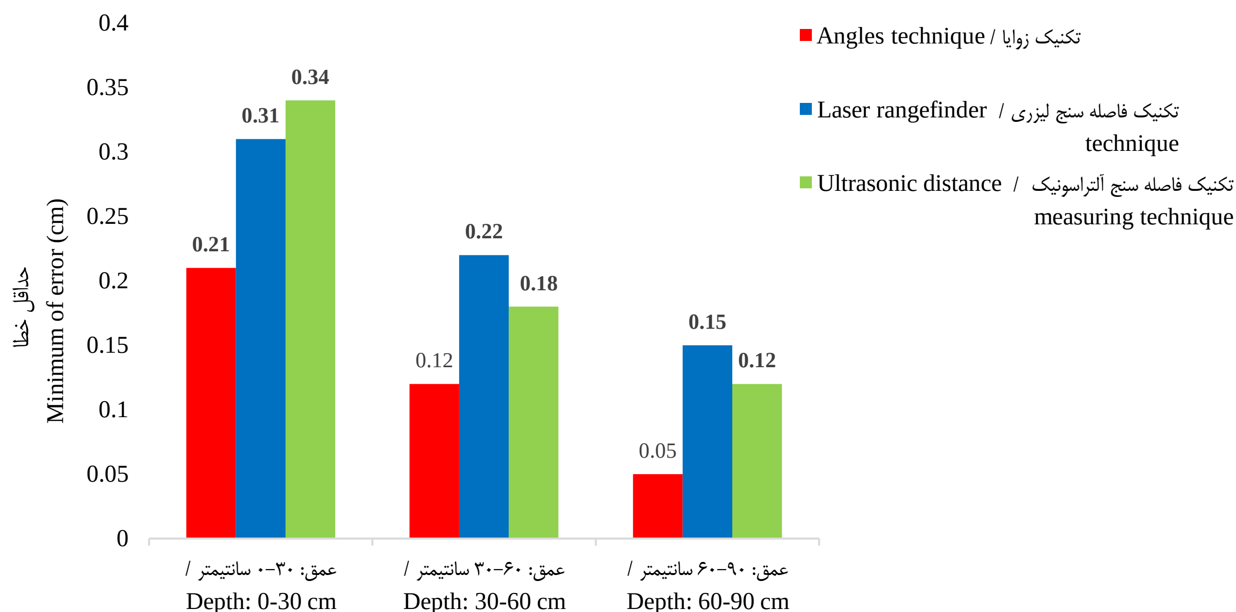
در پروژه کنترل خودکار عمق دستگاه زیرشکن (Fallahikoshali *et al.*, 2014)، حداقل خطا به میزان ۲/۳ میلی‌متر، مربوط به عمق ۵ سانتی‌متر هفتم مورد ارزیابی، گزارش شده است. همان‌طور که ذکر شد در پروژه مذکور ارزیابی‌ها با فاصله‌های ۵ سانتی‌متر و از عمق صفر تا ۳۵ سانتی‌متر انجام شده است. در پروژه تحقیقاتی طراحی عمق‌سنج برای گاوآهن برگردان‌دار (Alimardani *et al.*, 1998)، حداقل خطا صفر گزارش شده است. البته در پروژه مورد اشاره سطوح مورد ارزیابی، ثابت (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متری) بوده و دقت در حد سانتی‌متر می‌باشد.

حداکثر خطاهای عمق

مقایسه میانگین شاخص‌های آماری مورد ارزیابی نشان داد که در بین روش‌های عمق‌سنجی، روش زوایا با ۴/۴۹ سانتی‌متر و روش فراصوتی با ۷/۶۶ سانتی‌متر به‌ترتیب کمترین و بیشترین حداکثر خطای عمق را کسب نمودند. در بین دامنه‌های عمق نیز کمترین و بیشترین حداکثر خطای عمق، به‌ترتیب در دامنه عمیق با ۴/۷۱ سانتی‌متر و در دامنه سطحی با ۶/۹۷ سانتی‌متر به‌دست آمد (جدول ۳). همچنین مقایسه میانگین اثر متقابل دو عامل روش عمق‌سنجی و دامنه عمق نشان داد که کمترین و بیشترین مقادیر حداکثر خطا به‌ترتیب به روش زوایا و دامنه عمیق با ۳/۲۱ و روش فراصوتی و دامنه سطحی با ۸/۶۳ سانتی‌متر تعلق داشت (شکل ۹). حداکثر خطا همانند حداقل خطا تا حدودی یک اتفاق می‌تواند باشد، اما میانگین تکرارهای آن‌ها از روند یک‌دست و مشابه میانگین و انحراف معیار تبعیت کرده‌اند. خطاهای زیاد در اثر لرزش و نیز گاه در زمان تغییر زوایا و عمق رخ می‌دهند. همچنین همان‌طور که گفته شد شرایط زمین و کلوخه‌های بزرگ و نیز گودی‌های عمیق، خطاهای زیادی در روش‌های لیزری و فراصوتی ایجاد می‌کنند، لذا روش زوایا کمترین

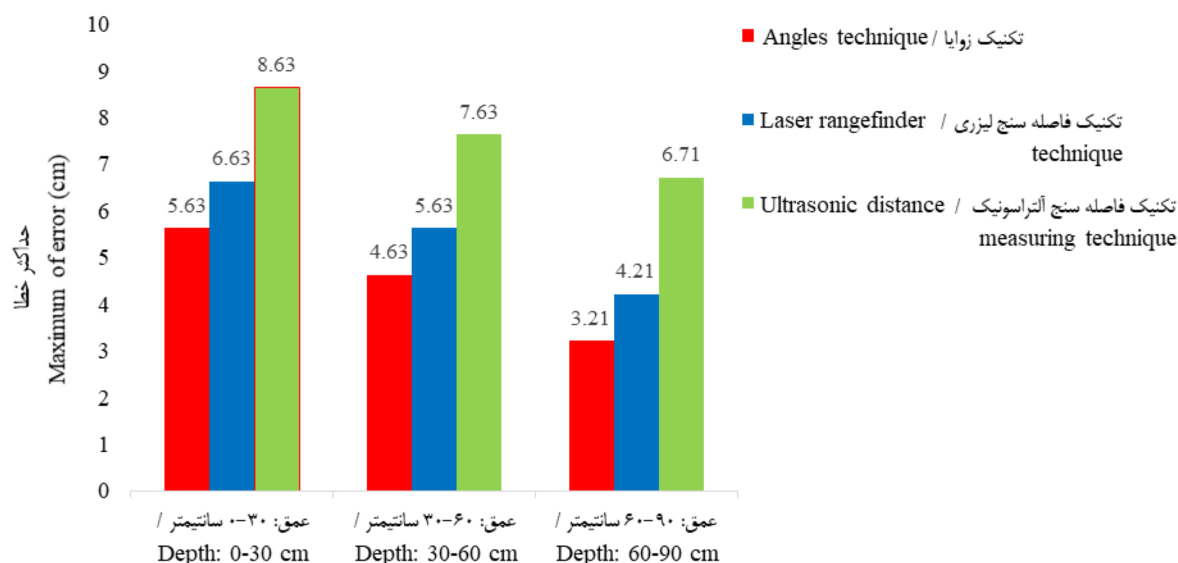
مقدار حداکثر خطا را داشته و نیز بین روش‌های لیزری و فراصوتی، روش لیزری حداکثر خطای کمتری داشته است. البته دلیل خطای زیاد در روش فراصوتی در حدوث زوایای بالا قبلاً بحث شد. به‌هرحال در همه روش‌ها با افزایش عمق، لرزش‌ها به حداقل رسیده و در نتیجه حداکثر خطا کمتر شده است.

در پروژه کنترل خودکار عمق دستگاه زیرشکن (Fallahikoshali *et al.*, 2014)، حداکثر خطا به میزان ۸/۳ میلی‌متر، مربوط به عمق ۵ سانتی‌متر دوم مورد ارزیابی، گزارش شده است. در پروژه تحقیقاتی طراحی عمق‌سنج برای گاوآهن برگرداندار (Alimardani *et al.*, 1998)، حداکثر خطا ۲ سانتی‌متر گزارش شده است. یادآور می‌شود تفاوت روش‌ها و دامنه عمق مورد ارزیابی می‌تواند دلیل تفاوت نتایج این پروژه‌ها با پروژه جاری باشد.



شکل ۸– مقایسه حداقل خطاهای عمق مربوط به اثر متقابل روش‌های مختلف عمق‌سنجی و دامنه‌های متفاوت عمق

Fig.8. The comparison the minimum of depth errors related to the interaction effect of different depth measurement techniques and different depth ranges



شکل ۹– مقایسه حداکثر خطاهای عمق مربوط به اثر متقابل روش‌های مختلف عمق‌سنجی و دامنه‌های متفاوت عمق

Fig.9. The comparison the maximum of depth errors related to the interaction effect of different depth measurement techniques and different depth ranges

نتیجه‌گیری

در این تحقیق سامانه سنجش عمق زیرشکن نصب‌شده بر بولدوزر براساس نمایش برای اپراتور و ارسال داده اندازه‌گیری‌شده همراه با موقعیت آن به سایت اینترنتی، طراحی و ساخته شد و در شرایط مزارع نیشکر مورد ارزیابی قرار گرفت. طراحی و ساخت در سه روش زوایا، لیزری و فراصوتی، و ارزیابی در سه دامنه عمق ۳۰-۰ (سطحی)، ۶۰-۳۰ (میانی) و ۹۰-۶۰ سانتی‌متری (عمیق) انجام شد.

از نظر روش‌های عمق‌سنجی، به‌طور کلی روش زوایا کمترین و روش فراصوتی بیشترین مقادیر را در شاخص‌های میانگین، انحراف معیار و حداکثر خطا داشتند. خطای بیشتر در روش‌های لیزری و فراصوتی به شرایط زمین و وجود کلوخه‌ها و گودی‌ها می‌تواند مرتبط باشد که این مساله باعث ایجاد خطا در محاسبه فاصله واقعی توسط حسگرهای فاصله‌سنج موجود در این دو روش شده است. لذا به‌طور مشخص روش مبتنی بر استفاده از حسگرهای زوایا برای اندازه‌گیری عمق زیرشکن متصل به بولدوزر در زمین‌های نیشکر توصیه می‌شود. این روش با دقت قابل‌قبول و بدون تحت تاثیر قرار گرفتن از شرایط زمین می‌تواند عمق کار را اندازه‌گیری نماید. در روش لیزری برای افزایش دقت و کمتر تحت تاثیر قرار گرفتن از وجود پستی و بلندی و نیز کلوخه‌ها، می‌توان با کاهش فاصله زمانی اخذ داده، تعداد داده‌ها در واحد زمان را افزایش داد و البته در این شرایط حسگر دقیق‌تر و پردازشگر قوی‌تری مورد نیاز می‌باشد. در روش فراصوتی نیز علاوه بر لزوم افزایش داده‌برداری در واحد زمان و مساله نیاز به حسگر دقیق‌تر و پردازشگر قوی‌تر، باید مشکل وجود خطای اندازه‌گیری فاصله در صورت افزایش زاویای شاسی‌ها را نیز مرتفع نمود. البته این مساله به ماهیت حسگرهای فراصوتی مرتبط است که در حسگرهای شرکت‌های سازنده دیگر باید مورد ارزیابی قرار گیرد که ممکن است این مشکل مرتفع شده باشد.

از نظر دامنه عمق مورد ارزیابی، در همه روش‌ها با افزایش عمق، تمام شاخص‌های میانگین، انحراف معیار، حداقل و حداکثر خطا کمتر شد و این می‌تواند مرتبط به کاهش لرزش دستگاه در عمق‌های بیشتر باشد. لذا به‌طور مشخص برای افزایش دقت در عمق‌های کمتر، هر نوع کاهش لرزش همچون کاهش سرعت پیشروی زیرشکنی با بولدوزر و نیز استفاده از دنده سنگین‌تر را می‌توان توصیه نمود.

سپاسگزاری

از مدیریت محترم شرکت کشت و صنعت امام خمینی (ره) به‌خاطر پشتیبانی مالی و نیز در اختیار قرار دادن تمام امکانات فنی و مزرعه‌ای، تشکر و سپاسگزاری می‌شود. همچنین از مدیریت محترم مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان که با استفاده از امکانات آزمایشگاهی و کارگاهی آن مرکز، این پروژه به نتیجه عملیاتی رسید، قدردانی و تشکر می‌گردد.

مشارکت نویسندگان

نعیم لویمی: روش‌شناسی، استخراج روابط ریاضی، پردازش داده‌ها، تحلیل آماری و استخراج و تهیه متن اولیه

آذرخش عزیزی: خدمات نرم‌افزاری، اعتبارسنجی، شبیه‌سازی کامپیوتری و ساخت مدار

علی کعب: پشتیبانی فنی، عملیات کارگاهی و ویرایش متن

عادل نیسی: مشاوره فنی، جمع‌آوری داده‌ها و ارزیابی مزرعه‌ای

References

1. Ahmadizadeh, M., & Charaghi, Sh. (2017). *Design and construction of depth measurement system and measurement of shear strength in sub-soiling operations and the importance of its application in monitoring the depth control of sub-soil*. 4th International Conference on Agricultural and Environmental Engineering with Sustainable Development Approach, Shiraz. (in Persian).
2. Al-Adawi, S. S., & Reeder, R. C. (1996). Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yield and soil physical properties. *ASAE, 39*(5), 1641-1649. https://doi.org/10.13031/2013.27680
3. Alimardani, R., Shahrbanunjad, M., & Borghee, A. (1998). Designing and construction a system for measuring the working depth of different plows. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, *29*(1), 19-26. (in Persian).
4. Anonymous. (2021). Agricultural crop cultivation model program. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Ministry of Jihad Agriculture. (in Persian).
5. Anonymous. (2023). Sugarcane production technology in Iran. Guidelines for the production of agricultural products. Ministry of Jihad Agriculture. (in Persian).
6. Bonaiuto, V., & Zanela, A. (2022). Improvement of the Sensor Capability of the NAO Robot by the Integration of a Laser Rangefinder. *Applied System Innovation*, *5*(6), 105. https://doi.org/10.3390/asi5060105
7. Carullo, A., & Parvis, M. (2001). An ultrasonic sensor for distance measurement in automotive applications. *IEEE Sensors Journal*, *1*(2), 143. https://doi.org/10.1109/JSEN.2001.936931
8. Cassel, D. K., & Edwards, E. C. (1985). Effects of subsoiling and irrigation on corn production. *Soil Science*

Society of America Journal, *49*(4), 996-1001. https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900040041x
9. Cheong, L. R. N., Kwong, K. F. K., & Preez, C. C. D. (2009). Soil compaction under sugarcane cropping and mechanization in Mauritius. *South African Journal of Plant and Soil*, *26*, 199-205. https://doi.org/10.1080/02571862.2009.10639955
10. Fallahikoshali, E., Aghkhani, M., & Bayati, M. (2015). Design, construction and evaluation of the automatic depth control device for tillage tools. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, *46*(2), 117-123. (in Persian). https://doi.org/10.22059/ijbse.2015.55669
11. Kaab, A., Sharifi, M., & Mobli, H. (2019). Analysis and optimization of energy consumption and greenhouse gas emissions in sugarcane production using data envelopment analysis. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, *50*(1), 19-30. (in Persian). https://doi.org/10.22059/ijbse.2018.251593.665035
12. Kiani, S., Kamgar, S. T., & Raoufat, M. (2010). Automatic on-line depth control of seeding units using a non-contacting ultrasonic sensor. *International Journal of Natural and Engineering Sciences*, *6*(2), 39-42.
13. Lou, S., He, J., Lu, C., Liu, P., Li, H., & Zhang, Z. (2021). A Tillage Depth Monitoring and Control System for the Independent Adjustment of Each Subsoiling Shovel. *Actuators*, *10*, 250. https://doi.org/10.3390/act10100250
14. Mahohi, A., & Khatinzadeh, H. (2021). Evaluation of Subsoiling Depth of Fields of Ratoon Cane on some Soil and Plant Indices. *Applied Soil Research*, *9*(3), 134-146. (in Persian).
15. Mansourirad, D. (1993). *Tractors and agricultural machines*. Bouali Sina Publications. (in Persian).
16. Mckyes, E., Nego, S., Douglas, F., Taylor, F., & Raghavan, G. S. U. (1979). The effect of machinery traffic and tillage on the physical properties of clay and on yield of silage corn. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *24*, 143- 148. https://doi.org/10.1016/0021-8634(79)90048-9
17. Moradinejad, N. (2017). Designing and implementing the electro-hydraulic tension adjustment system for the Massey Ferguson tractor using a new electronic control valve. *International Journal of Biosystems Engineering*, *48*(1), 155-163. (in Persian). https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.61575
18. Naseri, H., Gholamiparshekuhi, M., Ranjbar, I., & Mohammad Zamani, D. (2022). Evaluation of the effect of reduced and conventional tillage methods on machine performance parameters, soil properties and quantitative and qualitative efficiency of sugarcane. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, *80*(22), 17-32. (in Persian). https://doi.org/10.22092/amsr.2021.353026.1373
19. Pankhurst, C. E., Magarey, R. C., Sirling, G. R., Blair, B. L., Bell M. J., & Garside, A. L. (2003). Management practices to improve soil health and reduce the effects of detrimental soil biota associated with yield decline of sugarcane in Queensland, Australia. *Soil and Tillage Research*, *72*, 125-137. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00083-7
20. Sharif-Nasab, H., Heydari, A., Mehdi-Niya, H., Sadegh Nejad, R., & Shahrbanunjad, M. (2014). Investigating and determining the effect of using deep tillage tools on physical and chemical properties of soil and wheat yield. Research report of Agricultural Engineering and Technical Research Institute. Agricultural Research, Education and Extension Organization. (in Persian).
21. Slowinska–Jurkiewicz, A. (1994). Change in structure and physical properties of soil during spring tillage operations. *Soil and Tillage Research*, *29*, 397-407. https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)90111-2
22. Solhjo, A., Dehghanian, S. A., Sepaskhah, A., & Niromand Jahormi, J. (2006). Effect of subsoiling and Irrigation Fr3equencies on Soil Physical Properties and Sugarbeet Yield. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *6*(4), 131-144. (in Persian).
23. TaheriGaravand, A., Asakereh, A., & Haghani, K. (2010). Energy elevation and economic analysis of canola production in Iran a case study: Mazandaran province. *International Journal of Environmental Sciences*, *1*, 236-243.
24. Torres, J. L. R., Pereira, M. G., Cunha, M. A., Martins, M. E., & Vieira, D. M. S. (2013). Physicochemical properties of soil and biomass in sugarcane harvesting systems. *Agricultural Science Magazine*, *56*, 311-318. https://doi.org/10.4322/rca.2013.047
25. Tu, Y., Song, Y., Liu, F., Zhou, Y., Li, T., Zhi, S., & Wang, Y. (2022). An accurate and stable extrinsic calibration for a camera and a 1D laser range finder. *IEEE Sensors Journal*, *22*(10), 9832-9842. https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3166243
26. Wang, Y., Jing, H., Zhang, D., Cui, T., Zhong, X., & Yang, L. (2018). Development and performance evaluation of an electric-hydraulic control system for subsoiler with flexible tines. *Computers and Electronics in Agriculture*, *151*, 249-257. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.027